

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-84-95

## ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ АНОДНОГО И КАТОДНОГО ПОЛЯРИЗУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ НА СВОЙСТВА ПЭО-ПОКРЫТИЯ НА СПЛАВЕ МЛ5

И.А. Козлов<sup>1</sup>, С.В. Заварзин<sup>1</sup>, М.А. Фомина<sup>1</sup>, Е.В. Куршев<sup>1</sup>, Н.С. Лавров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; e-mail: bauman@bmstu.ru

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос влияния на структуру ПЭО-покрытия соотношения длительности воздействия анодного и катодного поляризующих напряжений при оксидировании детали из магниевого сплава в силикатно-фосфатном электролите. Выявлена линейная зависимость толщины покрытия от времени катодной поляризации. При использовании анодных импульсов малой длительности покрытие имеет многочисленные дефекты в виде пор, что негативно сказывается на его защитных свойствах.

**Ключевые слова:** магниевый сплав, оксидирование, плазменное электролитическое оксидирование, коррозия, защитные покрытия, микродуговое оксидирование

**Для цитирования:** Козлов И.А., Заварзин С.В., Фомина М.А., Куршев Е.В., Лавров Н.С. Влияние соотношения длительности анодного и катодного поляризующих импульсов на свойства ПЭО-покрытия на сплаве МЛ5 // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-84-95.

Scientific article

## INFLUENCE OF THE RATIO OF THE ANODIC AND CATHODIC IMPULSE ACTIVE TIMES ON THE PROPERTIES OF THE PLASMA ELECTROLYTIC COATING ON THE ML5 ALLOY

I.A. Kozlov<sup>1</sup>, S.V. Zavarzin<sup>1</sup>, M.A. Fomina<sup>1</sup>, E.V. Kurshev<sup>1</sup>, N.S. Lavrov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Moscow, Russia; e-mail: bauman@bmstu.ru

**Abstract.** Considers the question of the influence on the structure of the PEO coating of the time ratio of exposure to the polarizing voltage in the anodic and cathodic half-periods during the oxidation process in a silicate-phosphate electrolyte. A linear dependence of the time of cathodic polarization and the thickness of the coating formed on a cast magnesium alloy in a silicate-phosphate electrolyte has been revealed. When using anodic pulses of short duration, the coating has numerous defects in the form of pores, which negatively affects the protective properties.

**Keywords:** magnesium alloy, oxidation, plasma electrolytic oxidation, corrosion, protective coatings, microarc oxidation

**For citation:** Kozlov I.A., Zavarzin S.V., Fomina M.A., Kurshev E.V., Lavrov N.S. Influence of the ratio of the anodic and cathodic impulse active times on the properties of the plasma electrolytic coating on the ML5 alloy. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-84-95.

### Введение

В настоящее время применение деталей из магниевых сплавов в конструкциях авиационной и ракетной техники без дополнительной обработки поверхности сведено к минимуму или полностью исключено [1–3]. Обработка поверхности химическими, электрохимическими, плазменными и другими методами позволяет обеспечить требуемый уровень эксплуатационных свойств деталей и конструкции в целом.

Для деталей из магниевых сплавов обработка поверхности является одним из наиболее важных технологических процессов [4, 5]. Это связано с относительно невысокой стойкостью материала во влажной среде, при наличии ионов хлора и серы [6, 7]. Практика использования деталей из магниевых сплавов показала, что химическая или электрохимическая обработка поверхности существенно повышает стойкость материала к коррозии [8–10].

В мировой практике для защиты деталей из магниевых сплавов хорошо себя зарекомендовал процесс плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). Обработка поверхности методом ПЭО происходит при напряжении ~100 В для воспламенения плазмы на поверхности металла и образования оксидных соединений, имеющих высокую прочность сцепления с металлической подложкой. Плазма с высокой температурой (в диапазоне 6000–30000 К) [11] способствует сложным термохимическим и металлургическим реакциям на границе раздела металл/электролит, в результате чего образуется слой смешанных кристаллических и аморфных оксидов [12–14], состоящий из металлических соединений основы и электролита [15–17]. Покрытия, обработанные методом ПЭО (ПЭО-покрытия), обладают повышенной твердостью по сравнению с анодными покрытиями или покрытиями, обработанными методом химического оксидирования [18, 19]. Метод ПЭО применяют для многих металлических материалов, но особенно широко используют для титановых, алюминиевых и магниевых сплавов [18, 19].

Существенно вырос интерес исследователей к применению и созданию имплантатов из магниевых сплавов с ПЭО-покрытием за счет хорошей биосовместимости [20–22], а уникальные химические и физические свойства сплавов позволяют применять их в живом организме как биоразлагаемый материал [23, 24].

Следует отметить, что альтернативные варианты обработки (гальванические покрытия), используемые для многих конструкционных материалов [25–27], не подходят для магния и его сплавов. Осаждаемые металлы и сплавы имеют более положительный потенциал в водных растворах хлоридов и вместо защитного действия существенно ускоряют окисление металла [28, 29].

Проведенные исследования магниевых сплавов с ПЭО-покрытиями и обработка технологических приемов оксидирования позволили добиться существенного улучшения антикоррозионной защиты сплавов и выявить ряд закономерностей формирования у них ПЭО-покрытий. Так, коррозионные свойства ПЭО-покрытия определяются его толщиной, составом и микроструктурой. Толщину регулируют плотностью тока или напряжением. Повышение плотности приложенного тока или напряжения увеличивает скорость окисления металла и, следовательно, толщину покрытия [30]. Между тем состав и концентрация ингредиентов в электролите определяли состав покрытия [31]. Наиболее стабильным и практичным составом электролита для магниевых сплавов является силикатно-фосфатный [32, 33]. Кроме того, применение силикатов и фосфатов обеспечивает лучшие условия труда и наименьшую экологическую опасность.

В авиационной и ракетной технике номенклатура магниевых сплавов преимущественно состоит из литейных сплавов, используемых для изготовления крупногабаритных деталей и корпусов. Поскольку применение ПЭО в производстве связано с высокими

удельными затратами электрической энергии, это накладывает свои ограничения и требует повышения эффективности процесса нанесения. В настоящее время энергетическая эффективность процесса ПЭО низкая и в лучшем случае достигает 30 %.

Исследователями установлено, что существует линейная зависимость между толщиной покрытия и приложенным напряжением/плотностью тока. Однако существует предел, выше которого увеличение плотности тока не приводит к дальнейшему увеличению толщины покрытия. В процессе ПЭО происходит выделение кислорода в результате диссоциации воды на поверхности образца при наложении тока. Установлено, что скорость выделения кислорода медленно увеличивается с повышением приложенного напряжения до 300 В и снижает эффективность формирования покрытия. Поэтому предельное напряжение должно быть оптимизировано в зависимости от продолжительности обработки детали, ее размеров, величины тока и др.

В данной статье рассмотрена возможность повышения эффективности процесса формирования ПЭО-покрытия на магниевых сплавах за счет управления соотношением длительности анодного и катодного поляризующих импульсов.

### Материалы и методы

Комплекс исследований проводили на образцах из жаропрочного литейного магниевых сплава МЛ15, элементный состав которого соответствует ГОСТ 2856–79. При каждом исследуемом режиме параллельно испытывали от 3 до 5 образцов.

Плазменное электролитическое оксидирование образцов из сплава МЛ15 проводили в растворе, основными компонентами которого являлись технический силикат натрия ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) и ортофосфат натрия ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ) [33].

Для реализации процесса ПЭО использовали источник тока, позволяющий варьировать длительность анодного и катодного поляризующих импульсов. Режим оксидирования сплава подбирали исходя из выводов работы [34]. Оксидирование проводили с применением стальной ванны, оборудованной водяной системой охлаждения, в качестве противоиэлектрода. Форма используемого поляризующего сигнала и токовые режимы представлены на рис. 1 и в табл. 1 ( $X_1$  и  $X_2$  – длительность импульсов, мкс).

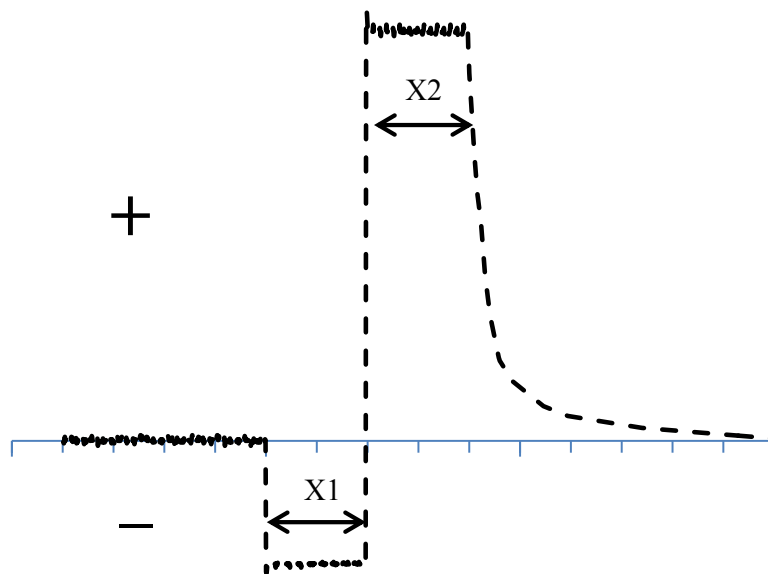


Рис. 1. Форма поляризующего сигнала напряжения, используемого для ПЭО

Таблица 1

Технологические параметры нанесения ПЭО-покрытия

Режим	Длительность импульсов, мкс	
	X1	X2
1	50	250
2	150	250
3	250	250
4	250	150
5	250	50

Амплитуду импульсов (рис. 1) варьировали в зависимости от количества образцов и расстояния до противоэлектрода.

Продолжительность технологического процесса, плотность тока (анодного и катодного), частота следования поляризующих импульсов, температура электролита и другие технологические параметры являлись неизменными для всех рассматриваемых вариантов.

Толщину формируемого ПЭО-покрытия измеряли с помощью переносного электронного толщиномера MiniTest 2100. На каждой стороне образца производили по 5 замеров, после чего выполняли расчет среднего значения.

Исследование структуры покрытия выполняли на поперечных шлифах образцов с покрытием методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Phenom ProX.

Исследование топографии поверхности проводили с применением 3D-профилометра Plu NEOX методом конфокальной лазерной микроскопии.

Электрохимические исследования осуществляли методом импедансной спектроскопии при комнатной температуре в 3 %-ном растворе NaCl. Площадь контакта образцов с электролитом, электрохимическая ячейка, оборудование и другие параметры данных исследований аналогичны ранее описанным в работах [33, 34].

### Результаты и обсуждение

Анализ толщины полученного в ходе экспериментов оксидного покрытия на образцах из литейного сплава МЛ5 позволил установить, что наименьшую толщину (~(3,9–4) мкм) получают при использовании режима 1 при минимальном значении длительности катодной поляризации. Увеличение времени поляризации в 3 раза – до 150 мкс (режим 2) приводит к увеличению толщины покрытия до 17,7–18,1 мкм, а при использовании режимов 3, 4 и 5, где длительность поляризации в катодный период составляет 250 мкс, толщина покрытий варьируется в диапазоне от 32,7 до 37,6 мкм.

Исследование рельефа поверхности образцов из сплава МЛ5 показало отсутствие существенных различий по шероховатости поверхности при использовании режимов нанесения ПЭО-покрытия 3, 4 и 5. Значение шероховатости варьируется от 2,3 до 3,2 мкм. Уменьшение длительности катодной поляризации при использовании режима 2 снижает шероховатость поверхности образцов с покрытием до 1,2 мкм, а при использовании режима 1 ее минимальное значение составляет 0,7 мкм. Следует отметить, что исходное значение шероховатости образцов, используемых для исследований, составляло не более 0,5 мкм.

Исследование поверхности образцов с применением СЭМ позволило установить, что с повышением длительности катодного поляризующего импульса (режимы 1,

2 и 3) от 50 до 250 мкс увеличиваются диаметры пор-кратеров, которые остаются после горения микроплазменных разрядов при реализации ПЭО (рис. 2). Сделано предположение, что именно изменение геометрических размеров пор влияет на изменение шероховатости поверхности. Дальнейшее изменение морфологии поверхности при использовании режимов 4 и 5 не столь существенно. При уменьшении времени анодной поляризации происходит увеличение пор-кратеров в диаметре по сравнению с морфологией покрытия, нанесенного по режиму 3.

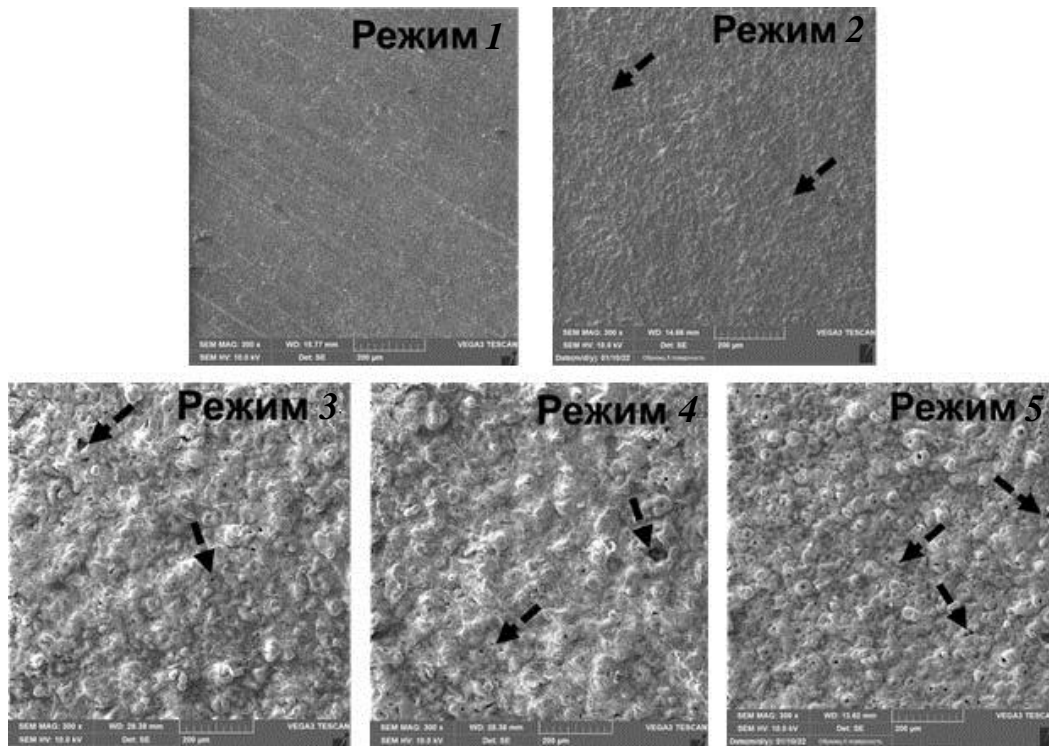


Рис. 2. Морфология поверхности образцов из сплава МЛ5 с ПЭО-покрытием (режимы нанесения покрытия указаны в табл. 1)

Фотографии структуры ПЭО-покрытия, полученного по рассматриваемым режимам, приведены на рис. 3. Исследование покрытий подтвердило полученные данные о толщине ПЭО-покрытия.

Оксидный слой, сформированный при использовании режима 1, имеет внутренние поры, не выходящие на поверхность, и протяженные по всей толщине от поверхности до металла каналы (рис. 3). При увеличении длительности катодной поляризации до 150 мкс структура покрытия изменяется. Помимо внутренних пор и протяженных по всей толщине покрытия каналов появляются дефекты в приповерхностном слое. Они располагаются у поверхности и являются следствием более интенсивного горения микроплазменных разрядов при ПЭО. Аналогичное изменение структуры наблюдают при использовании режима оксидирования 3, где длительность катодного поляризующего сигнала достигает 250 мкс. Диаметр пор возрастает, и в большинстве случаев они совмещены с протяженными по всей длине каналами миграции ионов металла. Уменьшение длительности анодной поляризации до 150 (режим 4) и 50 мкс (режим 5) приводит к увеличению геометрических размеров внутренних пор и уменьшению толщины внутреннего слоя покрытия. Одновременно с этим происходит раскрытие внутренних пор, что хорошо видно на рис. 2 и 3 (режим 5).

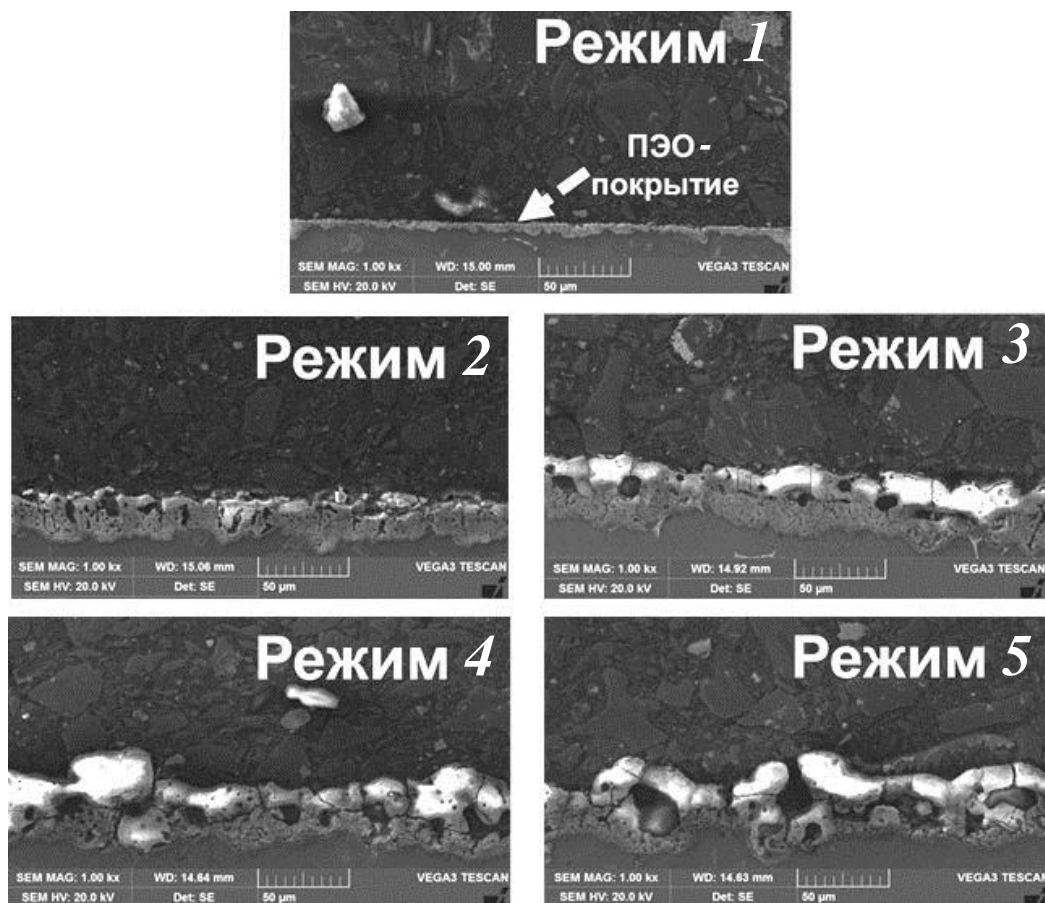


Рис. 3. Структура ПЭО-покрытия, полученного по различным режимам (режимы нанесения покрытия указаны в табл. 1), на поверхности образцов из сплава МЛ5

Проведенные электрохимические исследования позволили оценить защитную способность ПЭО-покрытия на образцах из сплава МЛ5. На рис. 4 представлен график изменения модуля импеданса ( $|Z|$ ) в зависимости от частоты. Наибольшее его значение наблюдается в области низких частот.

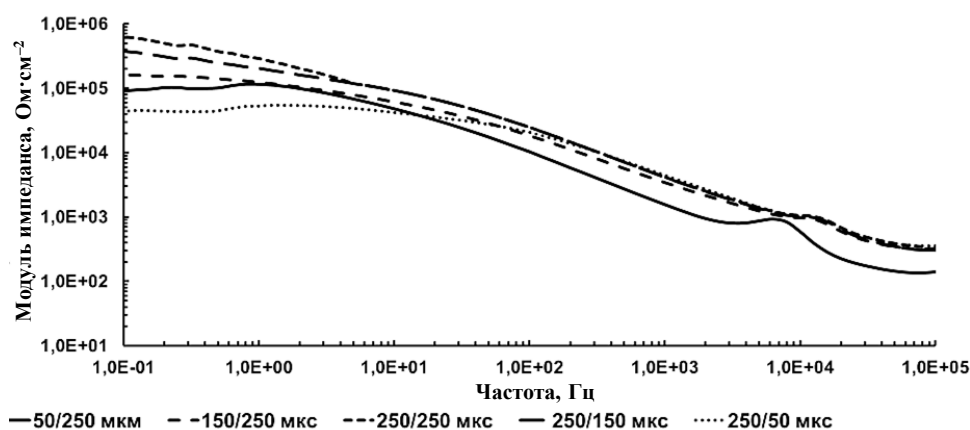


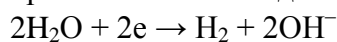
Рис. 4. Диаграмма Бode исследуемых покрытий на сплаве МЛ5

По результатам измерений модуля импеданса при значении частоты 0,1 Гц установлено, что, несмотря на высокую толщину покрытия, полученного по режиму 5, его

защитные свойства меньше, чем у покрытия, полученного по режиму 1 и имеющего самое низкое значение толщины. Значение  $|Z|$  для покрытия составляет  $0,43 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-2}$ , а при использовании режима 1:  $0,90 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-2}$ . Использование режима 3 обеспечивает получение максимальных защитных свойств для рассматриваемых условий формирования покрытий ( $|Z| = 6,30 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-2}$ ). Дальнейшее уменьшение длительности катодной поляризации приводит к снижению данного показателя. Результаты электрохимических измерений подтвердили, что наиболее плотная структура, лишенная многочисленных дефектов, позволяет наиболее эффективно изолировать магниевый сплав от атмосферного воздействия.

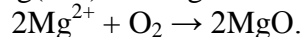
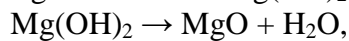
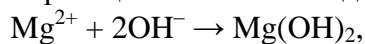
На основании полученных данных можно предположить, что при изменении токовых параметров происходит изменение механизма образования и горения микроплазменных разрядов. Так, при использовании режимов 1 и 2 процесс горения разрядов протекает на поверхности покрытия, что приводит к образованию малых объемных дефектов структуры. Крупные поры являются раскрытыми и находятся у поверхности. Увеличение длительности катодной поляризации приводит к накоплению большего количества газопаровой смеси и повышению интенсивности горения разрядов. Структура покрытий становится насыщенной крупными порами, а на их поверхности появляются поры в виде кратеров.

По результатам анализа морфологии и структуры образцов защитного покрытия, сформированного при использовании режимов 4 и 5, можно предположить, что существенное уменьшение длительности анодной поляризации приводит к значительному снижению интенсивности электрохимических реакций и, как следствие, появлению незакрытых пор-кратеров. Образование оксидного слоя происходит за счет горения плазменного разряда, а последующее разложение в катодный полупериод воды

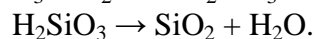
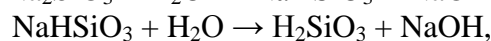
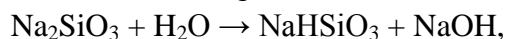


приводит к локальному изменению pH в щелочную сторону и разрушению покрытия вследствие травления. Последующее микроплазменное горение не компенсирует разрушения оксидной структуры. Результатом этих процессов становится образование толстых покрытий с большими внутренними дефектами, при этом толщина оксидного слоя существенно снижается.

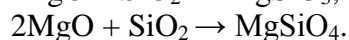
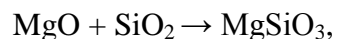
Использование режима 3 с наиболее высокой длительностью анодной поляризации позволяет существенно снизить внутреннюю пористость покрытия, а также запечатать поры на поверхности образца. Основным материалом для формирования ПЭО-покрытия при анодной поляризации являются соединения  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  и  $\text{MgO}$ :



Присутствие в электролите соединений силиката также обеспечивает рост покрытия, особенно поверхностного слоя. Вследствие гидролиза силиката натрия на поверхности покрытия осаждается оксид кремния:



Горение микроплазменных разрядов приводит к взаимодействию ионов магния с оксидом кремния и образованию труднорастворимых соединений:



Протекание процессов образования силикатов магния при малых концентрациях газопаровой смеси, образующейся в катодный полупериод, затруднительно. На практике формирование покрытия происходит только за счет электрохимических реакций (режим *I*), сопровождающихся плазменными разрядами малой интенсивности.

### Заключения

На основании полученных данных установлено, что на структуру и защитные свойства материала существенно влияет длительность поляризующих импульсов. Варьирование времени катодной поляризации в пределах от 50 до 250 мкс способствует изменению интенсивности горения микроплазменных разрядов в процессе ПЭО магниевых сплавов. Снижение длительности анодной поляризации уменьшает толщину внутреннего слоя защитного покрытия и увеличивает геометрические размеры дефектов.

Выявлена линейная зависимость времени поляризации от толщины покрытия для исследуемого металла и используемого в работе электролита. Увеличение длительности катодной поляризации от 50 до 250 мкс приводит к увеличению толщины ПЭО-покрытия от 3,9–4 мкм до 37,6 мкм.

При уменьшении времени анодной поляризации с 250 до 50 мкс толщина покрытия, так же как и шероховатость, остается практически неизменной. Однако зафиксировано изменение морфологии поверхности – увеличение диаметра пор. Сделано предположение, что раскрытие закрытых кратеров связано с уменьшением энергии, затрачиваемой на электрохимические реакции в период анодной поляризации, а процесс формирования ПЭО-покрытия протекает преимущественно за счет плазмохимических реакций.

Проведенная оценка защитных свойств электрохимическим методом позволила установить, что максимальная из рассматриваемых длительность катодной поляризации позволяет добиться значительного увеличения защитных свойств ПЭО-покрытия, но при уменьшении времени анодной поляризации до 50 мкс покрытие теряет защитные свойства – модуль импеданса в области низких частот минимален из всех рассматриваемых вариантов.

С целью совершенствования структуры ПЭО-покрытия для достижения максимального уровня защитных свойств необходимо экспериментально подбирать не только соотношение плотностей амплитудных значений тока, но и их продолжительности. Однако длительность поляризующих сигналов не должна превышать времени горения единичного микрозаряда. Образование вторичных и последующих разрядов также может привести к образованию пор и несплошностей ПЭО-покрытия.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
3. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
4. Мостяев И.В., Акинина М.В. Особенности и тенденции развития в области термической обработки магниевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 7 (67). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-41-48.

5. Мухина И.Ю., Уридия З.П., Трофимов Н.В. Коррозионностойкие литейные магниевые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 15–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-15-23.
6. Liu L.J., Schlesinger M. Corrosion of magnesium and its alloys // *Corrosion Science*. 2009. Vol. 51. No. 8. P. 1733–1737. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.04.025.
7. Song G., Atrons A., John D.S. et al. The anodic dissolution of magnesium in chloride and sulphate solutions // *Corrosion Science*. 1997. Vol. 39. No. 10–11. P. 1981–2004. DOI: 10.1016/S0010-938X(97)00090-5.
8. Hornberger H., Virtanen S., Voccaccini A.R. Biomedical coatings on magnesium alloys – A review // *Acta Biomaterialia*. 2012. Vol. 8. No. 7. P. 2442–2455. DOI: 10.1016/j.actbio.2012.04.012.
9. Козлов И.А., Виноградов С.С., Уридия З.П., Дуюнова В.А., Манченко В.А. Эффект предварительного травления сплава МЛ5 перед плазменным электролитическим оксидированием // *Труды ВИАМ*. 2018. № 9 (69). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-32-42.
10. Blawert C., Dietzel W., Ghali E., Song G. Anodizing treatments for magnesium alloys and their effect on corrosion resistance in various environments // *Advanced Engineering Materials*. 2006. Vol. 8. No. 6. P. 511–533. DOI: 10.1002/adem.200500257.
11. Wang L.I., Chen L.I., Yan Z., Fu W. Optical emission spectroscopy studies of discharge mechanism and plasma characteristics during plasma electrolytic oxidation of magnesium in different electrolytes // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 205. No. 6. P. 1651–1658. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.10.022.
12. Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A. et al. Plasma electrolysis for surface engineering // *Surface and Coatings Technology*. Vol. 122. No. 2–3. P. 73–93. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00441-7.
13. Kuhn A. Plasma anodizing of magnesium alloys // *Metal Finishing*. 2003. Vol. 101. No. 9. P. 44–50. DOI: 10.1016/S0026-0576(03)90261-3.
14. Козлов И.А., Виноградов С.С., Тарасова К.Г., Кулюшина Н.В., Манченко В.А. ПЭО магниевых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
15. Barati Darband G.H., Aliofkhaezrai M., Hamghalam P., Valizade N. Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2017. Vol. 5. No. 1. P. 74–132. DOI: 10.1016/j.jma.2017.02.004.
16. Lu X., Mohedano M., Blawert C. et al. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A review // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 307. P. 1165–1182. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.08.055.
17. Oh Y.-J., Mun J.-I., Kim J.-H. Effects of alloying elements on microstructure and protective properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings formed on aluminum alloy substrates by plasma electrolysis // *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 204. No. 1–2. P. 141–148. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.07.002.
18. Rudnev V.S., Adigamova M.V., Lukiyanchuk I.V. et al. Oxide coatings with ferromagnetic characteristics on Al, Ti, Zr and Nb // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 381. Art. 125180. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125180.
19. Гнеденков С.В., Синябрюхов С.Л., Машталяр Д.В. и др. Электрохимические и гидрофобные свойства композиционных ПЭО-покрытий, формируемых с использованием теломерного раствора ТФЭ // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2015. № 4. С. 20–27.
20. Song G.-L., Xu Z. The surface, microstructure and corrosion of magnesium alloy AZ31 sheet // *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55. No. 13. P. 4148–4161. DOI: 10.1016/j.electacta.2010.02.068.
21. Virtanen S. Biodegradable Mg and Mg alloys: Corrosion and biocompatibility // *Materials Science & Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*. 2011. Vol. 176. P. 1600–1608. DOI: 10.1016/j.mseb.2011.05.028.
22. Kannan M.B. Electrochemical deposition of calcium phosphates on magnesium and its alloys for improved biodegradation performance: A review // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 301. P. 36–41. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.12.044.

23. DeGarmo E.P., Black J.T., Kohser R.A. Materials and processes in engineering. 10th ed. Wiley, 2007. URL: <https://www.worldcat.org/title/degarmos-materials-and-processes-in-engineering/oclc/76935847> (дата обращения: 30.12.2021).
24. Kockar H., Meydan T. The rotation and clamping effect on the magnetic properties of iron films deposited onto a rotating substrate // *Physica B: Condensed Matter*. 2002. Vol. 321. No. 1–4. P. 124–128. DOI: 10.1016/S0921-4526(02)00836-0.
25. Karpuz A., Kockar H., Alper M. The effect of different chemical compositions caused by the variation of deposition potential on properties of Ni–Co films // *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257. No. 8. P. 3632–3635. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.11.092.
26. Kockar H., Bayirli M., Alper M. A new example of the diffusion-limited aggregation: Ni–Cu film patterns // *Applied Surface Science*. 2010. Vol. 256. No. 9. P. 2995–2999. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.11.063.
27. DeLong H.K. Electroplating on Magnesium // *Transactions of The Institute of Metal Finishing*. 1952. Vol. 29. No. 1. P. 201–226. DOI: 10.1080/00202967.1952.11869600.
28. Chen X.B., Yang H.Y., Abbott T.B. et al. Magnesium: Engineering the Surface // *JOM*. 2012. Vol. 64. No. 6. P. 650–656. DOI: 10.1007/s11837-012-0331-3.
29. Wu X., Su P., Jiang Z., Meng S. Influences of current density on tribological characteristics of ceramic coatings on ZK60 Mg alloy by plasma electrolytic oxidation // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2010. Vol. 2. No. 3. P. 808–812. DOI: 10.1021/am900802x.
30. Ono S., Moronuki S., Mori Y. et al. Effect of Electrolyte Concentration on the Structure and Corrosion Resistance of Anodic Films Formed on Magnesium through Plasma Electrolytic Oxidation // *Electrochimica Acta*. 2017. Vol. 240. P. 415–423. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.04.110.
31. Shi Z., Song G., Atrens A. Influence of anodising current on the corrosion resistance of anodised AZ91D magnesium alloy // *Corrosion Science*. 2006. Vol. 48. No. 8. P. 1939–1959. DOI: 10.1016/j.corsci.2005.08.004.
32. Asoh H., Matsuoka S., Sayama H., Ono S. Anodizing under sparking of AZ31B magnesium alloy in Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> solution // *Journal of the Japan Institute of Light Metals*. 2010. Vol. 60. P. 608–614.
33. Козлов И.А., Виноградов С.С., Наприенко С.А. Структура и свойства ПЭО-покрытия, формируемого на сплаве МЛ5 в электролите, содержащем силикаты и фосфаты // *Коррозия: материалы, защита*. 2017. № 8. С. 35–41.
34. Козлов И.А., Виноградов С.С., Кулюшина Н.В., Кутырев А.Е., Пастухов А.С. Влияние соотношения амплитуд поляризующего тока на защитные свойства ПЭО-покрытия, формируемого на сплаве МЛ5 // *Коррозия: материалы, защита*. 2016. № 11. С. 40–48.

#### References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Report XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
2. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
3. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260). pp. 3–16.
4. Mostyaev I.V., Akinina M.V. Features and development trends in the field of heat treatment of magnesium alloys (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 7 (67), paper no. 5. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 9, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-41-48.
5. Mukhina I.Yu., Uridiya Z.P., Trofimov N.V. Corrosion-resistant casting magnesium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 15–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-15-23.

6. Liu L.J., Schlesinger M. Corrosion of magnesium and its alloys. *Corrosion Science*, 2009, vol. 51, no. 8, pp. 1733–1737. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.04.025.
7. Song G., Atrens A., John D.S. et al. The anodic dissolution of magnesium in chloride and sulphate solutions. *Corrosion Science*, 1997, vol. 39, no. 10–11, pp. 1981–2004. DOI: 10.1016/S0010-938X(97)00090-5.
8. Hornberger H., Virtanen S., Boccaccini A.R. Biomedical coatings on magnesium alloys – A review. *Acta Biomaterialia*, 2012, vol. 8, no. 7, pp. 2442–2455. DOI: 10.1016/j.actbio.2012.04.012.
9. Kozlov I.A., Vinogradov S.S., Uridiya Z.P., Duyunova V.A., Manchenko V.A. Effekt predvaritelnogo travleniya splava ML5 pered plazmennym elektroliticheskim oksidirovaniyem [Effect of preliminary etching of alloy ML5 before plasma electrolytic oxidation]. *Trudy VIAM*, 2018, no. 9 (69), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 9, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-32-42.
10. Blawert C., Dietzel W., Ghali E., Song G. Anodizing treatments for magnesium alloys and their effect on corrosion resistance in various environments. *Advanced Engineering Materials*, 2006, vol. 8, no. 6, pp. 511–533. DOI: 10.1002/adem.200500257.
11. Wang L.I., Chen L.I., Yan Z., Fu W. Optical emission spectroscopy studies of discharge mechanism and plasma characteristics during plasma electrolytic oxidation of magnesium in different electrolytes. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205, no. 6, pp. 1651–1658. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.10.022.
12. Erokhin A.L., Nie X., Leyland A. et al. Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, vol. 122, no. 2–3, pp. 73–93. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00441-7.
13. Kuhn A. Plasma anodizing of magnesium alloys. *Metal Finishing*, 2003, vol. 101, no. 9, pp. 44–50. DOI: 10.1016/S0026-0576(03)90261-3.
14. Kozlov I.A., Vinogradov S.S., Tarasova K.G., Kulyushina N.V., Manchenko V.A. Plasma electrolytic oxidation of magnesium alloys (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
15. Barati Darband G.H., Aliofkhaezrai M., Hamghalam P., Valizade N. Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 74–132. DOI: 10.1016/j.jma.2017.02.004.
16. Lu X., Mohedano M., Blawert C. et al. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A review. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 307, pp. 1165–1182. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.08.055.
17. Oh Y.-J., Mun J.-I., Kim J.-H. Effects of alloying elements on microstructure and protective properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings formed on aluminum alloy substrates by plasma electrolysis. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 204, no. 1–2, pp. 141–148. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.07.002.
18. Rudnev V.S., Adigamova M.V., Lukiyanchuk I.V. et al. Oxide coatings with ferromagnetic characteristics on Al, Ti, Zr and Nb. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 381, art. 125180. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125180.
19. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V. et al. Electrochemical and hydrophobic properties of composite PEO coatings formed using TFE telomeric solution. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk*, 2015, no. 4, pp. 20–27.
20. Song G.-L., Xu Z. The surface, microstructure and corrosion of magnesium alloy AZ31 sheet. *Electrochimica Acta*, 2010, vol. 55, no. 13, pp. 4148–4161. DOI: 10.1016/j.electacta.2010.02.068.
21. Virtanen S. Biodegradable Mg and Mg alloys: Corrosion and biocompatibility. *Materials Science & Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 2011, vol. 176, pp. 1600–1608. DOI: 10.1016/j.mseb.2011.05.028.
22. Kannan M.B. Electrochemical deposition of calcium phosphates on magnesium and its alloys for improved biodegradation performance: A review. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 301, pp. 36–41. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.12.044.
23. DeGarmo E.P., Black J.T., Kohser R.A. *Materials and processes in engineering*. Available at: <https://www.worldcat.org/title/degarmos-materials-andprocesses-in-engineering/oclc/76935847> (accessed: December 30, 2021).

24. Kockar H., Meydan T. The rotation and clamping effect on the magnetic properties of iron films deposited onto a rotating substrate. *Physica B: Condensed Matters*, 2002, vol. 321, no. 1–4, pp. 124–128. DOI: 10.1016/S0921-4526(02)00836-0.
25. Karpuz A., Kockar H., Alper M. The effect of different chemical compositions caused by the variation of deposition potential on properties of Ni–Co films. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, no. 8, pp. 3632–3635. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.11.092.
26. Kockar H., Bayirli M., Alper M. A new example of the diffusion-limited aggregation: Ni–Cu film patterns. *Applied Surface Science*, 2010, vol. 256, no. 9, pp. 2995–2999. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.11.063.
27. DeLong H.K. Electroplating on Magnesium. *Transactions of The Institute of Metal Finishing*, 1952, vol. 29, no. 1, pp. 201–226. DOI: 10.1080/00202967.1952.11869600.
28. Chen X.B., Yang H.Y., Abbott T.B. et al. Magnesium: Engineering the Surface. *JOM*, 2012, vol. 64, no. 6, pp. 650–656. DOI: 10.1007/s11837-012-0331-3.
29. Wu X., Su P., Jiang Z., Meng S. Influences of current density on tribological characteristics of ceramic coatings on ZK60 Mg alloy by plasma electrolytic oxidation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 808–812. DOI: 10.1021/am900802x.
30. Ono S., Moronuki S., Mori Y. et al. Effect of Electrolyte Concentration on the Structure and Corrosion Resistance of Anodic Films Formed on Magnesium through Plasma Electrolytic Oxidation. *Electrochimica Acta*, 2017, vol. 240, pp. 415–423. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.04.110.
31. Shi Z., Song G., Atrens A. Influence of anodising current on the corrosion resistance of anodised AZ91D magnesium alloy. *Corrosion Science*, 2006, vol. 48, no. 8, pp. 1939–1959. DOI: 10.1016/j.corsci.2005.08.004.
32. Asoh H., Matsuoka S., Sayama H., Ono S. Anodizing under sparking of AZ31B magnesium alloy in Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> solution. *Journal of the Japan Institute of Light Metals*, 2010, vol. 60, pp. 608–614.
33. Kozlov I.A., Vinogradov S.S., Naprienko S.A. Structure and properties of a PEO coating formed on an ML5 alloy in an electrolyte containing silicates and phosphates. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2017, no. 8, pp. 35–41.
34. Kozlov I.A., Vinogradov S.S., Kulyushina N.V., Kutyrev A.E., Pastukhov A.S. Influence of the polarizing current amplitude ratio on the protective properties of the PEO coating formed on the ML5 alloy. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2016, no. 11, pp. 40–48.

**Информация об авторах**

**Козлов Илья Андреевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Заварзин Семен Витальевич**, ведущий инженер, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Фомина Марина Александровна**, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Куршев Евгений Васильевич**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Лавров Никита Сергеевич**, студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauman@bmstu.ru

**Information about the authors**

**Ilya A. Kozlov**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Semyon V. Zavarzin**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Marina A. Fomina**, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Yevgeny V. Kurshev**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Nikita S. Lavrov**, Student, «Bauman Moscow State Technical University», bauman@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.01.2022.

The article was submitted 17.01.2022; approved and accepted for publication after reviewing 25.01.2022.